

Санкт-Петербургский государственный университет

Механика и математическое моделирование

Физическая механика

Соболев Кирилл Олегович

Оптимизация параметров электромеханической системы
катушка – кольцевой образец при магнитно-импульсном
нагрузении

Бакалаврская работа

Научный руководитель:
профессор с возложенными
обязанностями заведующего
кафедрой, д.ф.-м. н.,
доцент, Морозов В. А.

Рецензент:
Инженер-программист
К. ф.-м. н. Кац В. М.

Санкт-Петербург

2016

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Mechanics and mathematical modeling

Physical mechanics

Kirill Sobolev

Optimization of electromechanical coil – ring sample system
parameters under magnetic pulse loading

Bachelor's Thesis

Scientific supervisor:

Head of Department, doctor of physical and
mathematical sciences, assistant professor

Viktor Morozov

Reviewer:

Software Developer, PhD

Viktor Kats

Saint-Petersburg

2016

Содержание

Введение	4
1. Описание магнитно-импульсного метода	5
2. Анализ уравнений колебаний в системе катушка-кольцо	8
3. Уравнение движения тонкого кольца	10
4. Расчёт силовых характеристик	13
5. Результаты экспериментов	14
Заключение	18
Список использованной литературы	20

Введение

Данная работа носит реферативный характер и являет собой обзор исследований на тему деформирования и разрушения тонких металлических колец, проведенных Н. Zhang и К. Ravi-Chandar [1-3], а также научными группами, под руководством Морозова В. А. и Петрова Ю. В. [4-7]. Данная тема представляет научный и практический интерес с точки зрения деформирования и разрушения материалов в экстремальных условиях динамического нагружения.

В работах американских исследователей приведены результаты экспериментов по разрушению металлических колец под воздействием ударного нагружения магнитно-импульсным методом. Использование данного метода позволило достичь скоростей деформации порядка 10^4 с^{-1} , которым соответствует радиальная скорость расширения образца в промежутке 80-200 м/с. Одним из нововведений в этих работах была высокоскоростная камера высокого разрешения с интервалами между кадрами около 10 мкс, с помощью которой изучалась динамика образования шеек и последующего разрушения образцов. Полученные последовательности кадров использовались для определения радиуса как функции времени, после чего дифференцированием полученной функции определялась радиальная скорость расширения кольца. В работах также было показано, что временной промежуток между первым разломом и окончательным разрушением кольца составляет около 15 мкс, что значительно меньше времени первого периода колебаний тока в кольце.

В работах российских ученых были разработаны и использованы три модификации магнитно-импульсного метода. Опробованный метод заключается в использовании для деформации и разрушения металлического образца силового взаимодействия токов, протекающих через катушку индуктивности и коаксиально надетый на нее кольцевой образец, в соответствии с законом

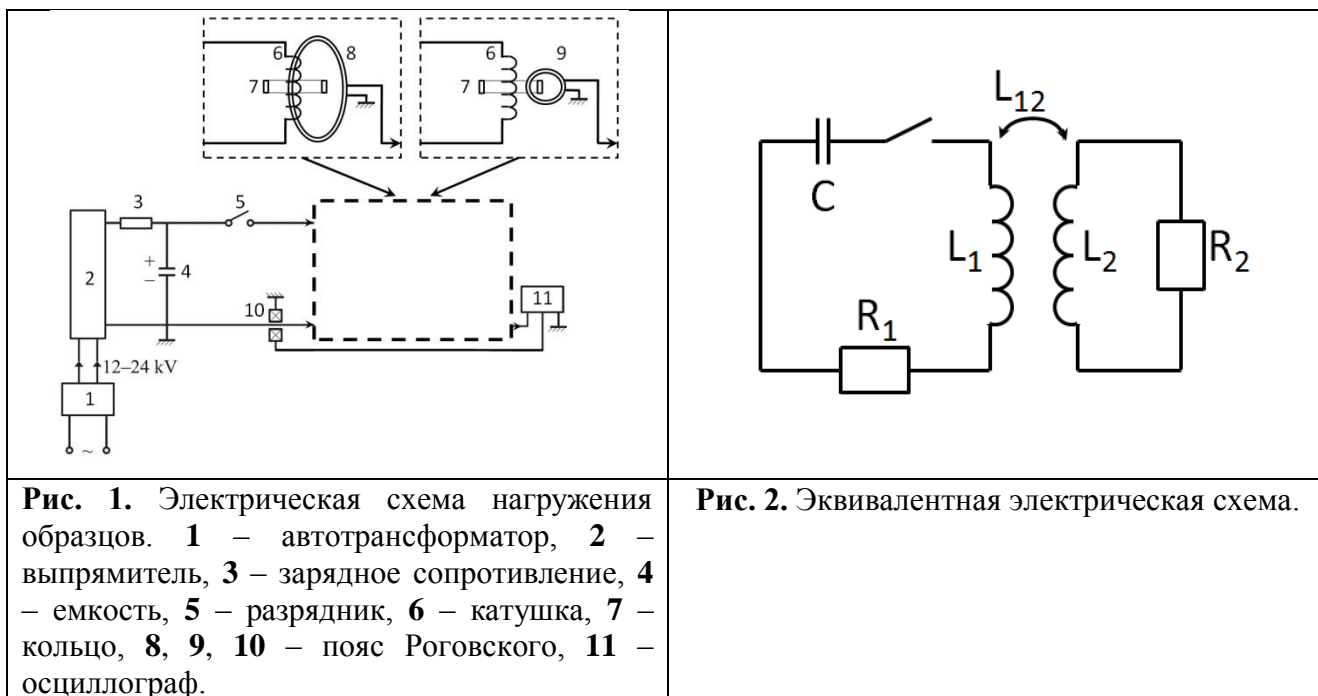
Ампера. Основными трудностями, связанными с этим методом, являются нахождение индукционного тока, возникающего в кольце, и регистрация разрушения материала, в отсутствие высокоскоростной камеры. Для измерения тока в кольце были опробованы два метода, использующие пояс Роговского. Для регистрации начала разрушения образца использовался фотодиод, с помощью которого фиксировался момент возникновения искры, соответствующей первоначальному разрыву кольца. Предложенные в работах методы, позволили уменьшить время периода нагружения образца до 7.5 мкс, 1 мкс и 0.08 мкс, что значительно влияет на процесс разрушения материала. Было продемонстрировано, что при воздействии более коротким импульсом пластичный материал разрушается хрупко, тогда как при воздействии длинным – вязко. Помимо получения и обработки экспериментальных данных был проведен анализ уравнений, с помощью которых описываются электромагнитные колебания, возникающие в катушке и кольце, как в системе связанных контуров. Выведено уравнение движения кольцевого образца, из которого видно, что для него не существует аналитического решения, таким образом, поставлена проблема численного решения этого уравнения.

1. Описание магнитно-импульсного метода

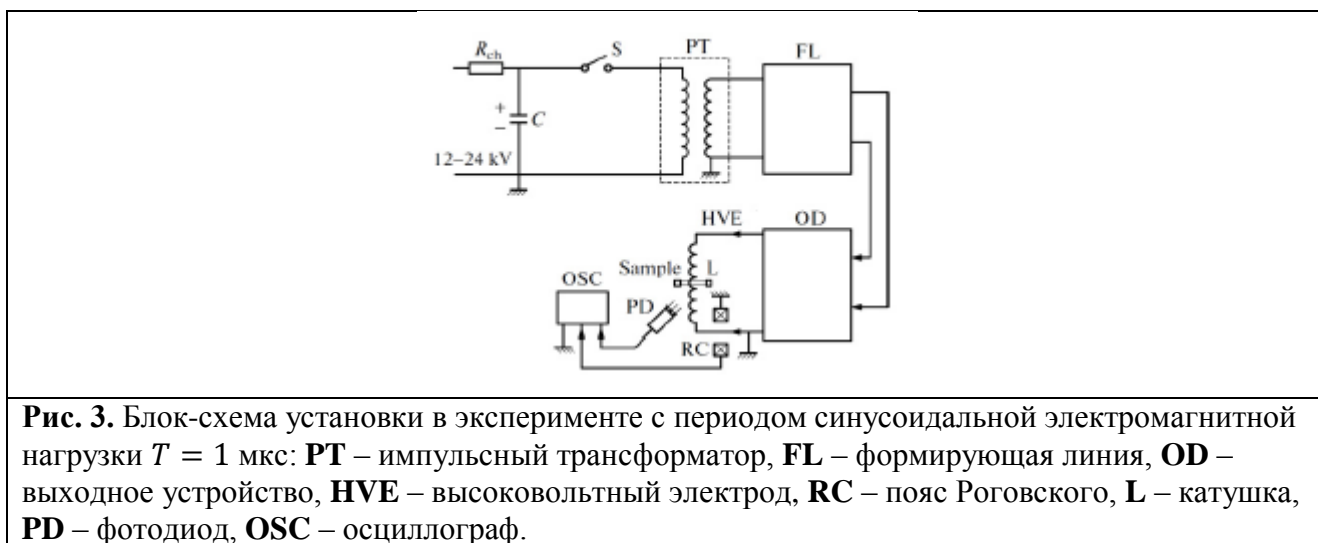
Магнитно-импульсный метод, модификации которого реализованы на базе ГКВИ-300 – генератора высоковольтных импульсов, позволяет нагружать тонкие металлические кольцевые образцы толщиной 0.11 – 0.4 мм и шириной 0.5 – 1 мм, а также металлические фольги толщиной 0.015 – 0.030 мм и шириной 0.8 – 5 мм. Электрические напряжения, формируемые генератором, имели амплитуды 10 – 25 кВ. Реализовывались гармонические нагрузки с периодами тока $T = 1$ мкс (так называемое короткое воздействие) и $T =$

(5.5 – 7.5) мкс (длительное воздействие). Также реализовывалось короткое импульсное воздействие с длительностью импульса $T = 0.08$ мкс.

Электрическая блок-схема установки, использовавшейся в экспериментах с длительным воздействием [4], изображена на **рис. 1**; на **рис. 2** изображена эквивалентная ей схема, которая является системой связанных между собой контуров. Конденсатор (4), использовавшийся в испытаниях образцов, имел емкость 0.5 мкФ. Выпрямитель (2) осуществлял заряд конденсатора с регулируемым напряжением, после чего, с помощью высоковольтного разрядника (5) производилась разрядка через катушку, изготовленную из медного провода диаметром 1 мм. Катушка насчитывает 5 витков, её диаметр составляет 25 мм. Ток, проходящий через катушку, порождает индукционный ток в кольце, являющийся противоположным по направлению току в катушке, согласно правилу Ленца. В соответствии с законом Ампера, проводники, в которых токи текут в противоположном направлении, отталкиваются, так что взаимодействие этих токов порождает силу, приводящую в конечном итоге к разрушению образца.



В случае [5] испытания образцов, когда период T затухающих колебаний тока, пропускаемого через катушку, был равен 1 мкс, применялась более сложная установка, принципиально отличающаяся от вышеописанной. На рис. 3 представлена её блок-схема. Благодаря импульсному трансформатору – **PT**, системе двух связанных электрических контуров и формирующей линии – **FL**, напряжение синусоидального сигнала удалось повысить в 10 раз по сравнению с первым случаем. Напряжение подавалось на катушку через выходное устройство – **OD**. Период колебаний тока в этой системе составлял, в отличие от предыдущего случая, 1 мкс.



При дальнейшем усовершенствовании вышеописанной установки, удалось реализовать нагружение коротким импульсом длительностью 0.08 мкс. Блок-схема использовавшейся в этом эксперименте установки представлено на рис. 4. Принципиальное отличие этого способа от предыдущего заключается в том, что вместо гармонического нагружения реализуется импульсный. Катушка – **L**, в этой установке, в отличие от предыдущих, имеет лишь один виток, с которым последовательно включен резистор с сопротивлением $R = 12.5$ Ом в коаксиальной схеме выходного устройства установки.

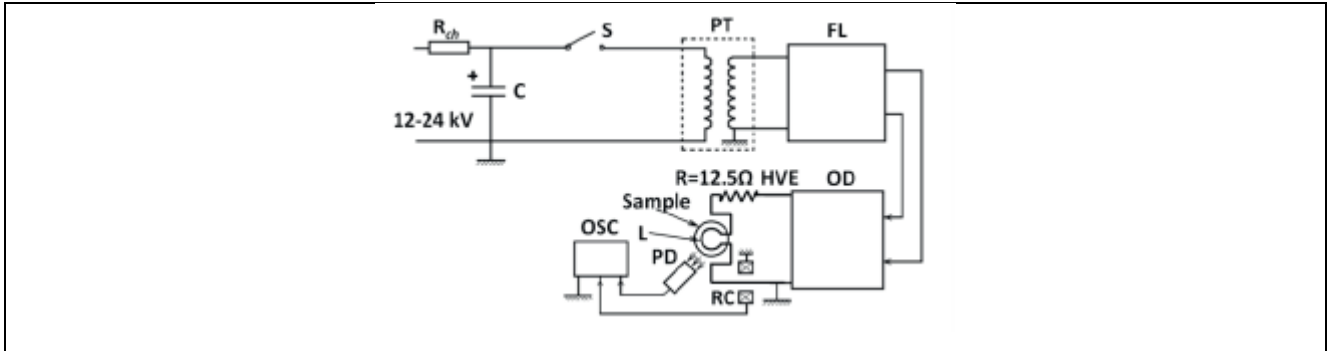


Рис. 4. Блок-схема установки при воздействии коротким импульсом длительностью 0.08 мкс: **PT** – импульсный трансформатор, **FL** – формирующая линия, **OD** – выходное устройство, **HVE** – высоковольтный электрод, **RC** – пояс Роговского, **L** – катушка, **PD** – фотодиод, **OSC** – осциллограф.

2. Анализ уравнений колебаний в системе катушка-кольцо

Для описания системы связанных контуров, представленных на **рис. 2**, воспользуемся вторым законом Кирхгофа. Учитывая тот факт, что после разрядки в основной цепи нет источника ЭДС и, соответственно, алгебраическая сумма падений напряжений на всех ветвях этого контура равна нулю, получаем систему из двух уравнений:

$$U_c + L_1 \frac{dI_1}{dt} + I_1 R_1 + L_{12} \frac{dI_2}{dt} = 0, \quad (1)$$

$$L_2 \frac{dI_2}{dt} + I_2 R_2 + L_{21} \frac{dI_1}{dt} = 0, \quad (2)$$

где U_c – напряжение заряженного конденсатора, L_1 – индуктивность катушки, R_1 – сопротивление контура, L_2 – индуктивность кольца, R_2 – сопротивление кольца, $L_{12} = L_{21}$ – взаимная индуктивность контура и кольца, I_1 и I_2 – токи в контуре и кольце соответственно. Согласно проведённым расчётам коэффициента связи данной системы и индуктивности L_1 самой катушки, $L_{12} \ll L_1$. С учётом этого, уравнение (1) принимает вид:

$$U_c + L_1 \frac{dI_1}{dt} + I_1 R_1 = 0. \quad (3)$$

Это уравнение является обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка, и его решение находится в следующем виде:

$$I_1 = I_{10} e^{-pt} \sin(\omega t + \alpha), \quad (4)$$

где $I_{10} = \frac{U_c}{L_1 \omega}$, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - p^2}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C}}$, $p = \frac{R_1}{2L_1}$.

Из начальных условий следует, что $\alpha = 0$, так как $I_1(0) = I_{10} \sin(\alpha) = 0$.

Продифференцировав решение уравнения для тока I_1 по времени, получим:

$$\frac{dI_1}{dt} = -pI_{10} e^{-pt} \sin(\omega t) + I_{10} \omega e^{-pt} \cos(\omega t). \quad (5)$$

Для силы тока в кольце решение ищется в следующем виде:

$$I_2 = A e^{-pt} \sin(\omega t) + B e^{-pt} \cos(\omega t), \quad (6)$$

где коэффициенты A и B будут определены далее. Подставляя (6) и (5) в (2), получаем:

$$\begin{aligned} & L_2(-A p e^{-pt} \sin(\omega t) + \omega A e^{-pt} \cos(\omega t) - B p e^{-pt} \cos(\omega t) \\ & \quad - \omega B e^{-pt} \sin(\omega t)) + R_2 A e^{-pt} \sin(\omega t) + R_2 B e^{-pt} \cos(\omega t) = \\ & \quad L_{21}(-p I_{10} e^{-pt} \sin(\omega t) + I_{10} \omega e^{-pt} \cos(\omega t)), \\ & e^{-pt} [\sin(\omega t)(-L_2 A p - L_2 \omega B + R_2 A) + \cos(\omega t)(L_2 \omega A - L_2 B p + R_2 B)] \\ & = e^{-pt} [\sin(\omega t)(L_{21} p I_{10}) - \cos(\omega t)(L_{21} I_{10} \omega)]. \end{aligned} \quad (7)$$

После сокращения левой и правой частей уравнения (7) на e^{-pt} , а также после приравнивания членов, находящихся при $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$ в левой и правой частях уравнения, получается следующая система уравнений, из которой определяются коэффициенты A и B :

$$\begin{aligned} (R_2 - L_2 p)A - L_2 \omega B &= I_{10} p L_{21}, \\ L_2 \omega A + (R_2 - L_2 p)B &= -I_{10} \omega L_{21}. \end{aligned} \quad (8)$$

Определителями этой системы уравнений будут:

$$D = \begin{vmatrix} R_2 - L_2 p & L_2 \omega \\ L_2 \omega & R_2 - L_2 p \end{vmatrix} = (R_2 - L_2 p)^2 + (L_2 \omega)^2,$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} I_{10}pL_{21} & -L_2\omega \\ -I_{10}\omega L_{21} & R_2 - L_2p \end{vmatrix} = I_{10}pL_{21}(R_2 - L_2p) - L_2\omega^2 I_{10}L_{21},$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} R_2 - L_2p & I_{10}pL_{21} \\ L_2\omega & -I_{10}\omega L_{21} \end{vmatrix} = I_{10}\omega L_{21}(L_2p - R_2) - L_2\omega I_{10}pL_{21} = -I_{10}\omega L_{21}R_2,$$

И, таким образом:

$$A = \frac{D_1}{D} = \frac{I_{10}pL_{21}(R_2 - L_2p) - L_2\omega^2 I_{10}L_{21}}{(R_2 - L_2p)^2 + (L_2\omega)^2} = I_{10}L_{21} \frac{-L_2(p^2 + \omega^2) + pR_2}{(R_2 - L_2p)^2 + (L_2\omega)^2},$$

$$B = \frac{D_2}{D} = \frac{-I_{10}\omega L_{21}R_2}{(R_2 - L_2p)^2 + (L_2\omega)^2}.$$

3. Уравнение движения тонкого кольца

Далее имеет смысл вывести уравнение движения кольца, чтобы определить его вид и показать, от каких параметров зависит его движение. Для этого запишем уравнение энергетического баланса в приращениях:

$$dK + d\Pi = dW,$$

где dK – приращение кинетической энергии,

$d\Pi$ – приращение внутренней энергии,

dW – работа внешних сил.

$$dK = d\left(2\pi R h b \rho \frac{\dot{R}^2}{2}\right) = \pi h b \rho d(R\dot{R}^2) = \pi h b \rho (\dot{R}^2 dR + 2R\dot{R}\ddot{R}dt),$$

$$d\Pi = 2\pi R h b \sigma d\varepsilon = 2\pi h b \sigma dR,$$

$$dW = 2\pi R b q dR,$$

где R – радиус кольца, h – толщина кольца, σ – окружное напряжение в кольце, b – ширина кольца, ρ – плотность материала кольца, q – распределённая радиальная нагрузка на внутреннюю поверхность кольца.

Из соотношения баланса энергии $dK + d\Pi = dW$, получаем:

$$\rho h \dot{R}(\dot{R}^2 + 2R\ddot{R})dt + 2h\sigma \dot{R}dt = 2Rq \dot{R}dt,$$

откуда

$$\rho \left(\frac{\dot{R}^2}{2R} + \ddot{R} \right) + \frac{\sigma}{R} = \frac{q}{h}. \quad (9)$$

Если $\frac{\dot{R}^2}{2R} \ll \ddot{R}$, (*)

тогда (9) превращается в

$$\rho \ddot{R} + \frac{\sigma}{R} = \frac{q(t)}{h}. \quad (10)$$

Связь между напряжением и деформацией кольца определяется законом Гука:

$$\sigma = E \frac{R - R_0}{R_0}, \quad (11)$$

где E – модуль Юнга, R_0 – первоначальный радиус кольца. Из выражения (11) находится радиус кольца:

$$R = \frac{R_0}{E} \sigma + R_0, \quad \frac{dR}{dt} = \frac{R_0}{E} \frac{d\sigma}{dt}, \quad \frac{d^2 R}{dt^2} = \frac{R_0}{E} \frac{d^2 \sigma}{dt^2}. \quad (12)$$

После подстановки (12) в (10) получается следующее уравнение:

$$\rho \frac{R_0}{E} \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{\sigma}{R} = \frac{q(t)}{h}, \quad (13)$$

частота собственных колебаний кольца $\omega = \frac{1}{R_0} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, откуда $E = \omega^2 R_0^2 \rho$.

Подставив это выражение в (13):

$$\rho \frac{R_0}{\omega^2 R_0^2 \rho} \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{\sigma}{R} = \frac{q(t)}{h}, \quad (13)$$

помножив это выражение на $\omega^2 R_0$, можно переписать полученный результат в таком виде:

$$\frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \frac{\sigma \omega^2 R_0}{R} = \frac{q(t)}{h} \omega^2 R_0,$$

с учётом $R \approx R_0$ выходит:

$$\frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \sigma \omega^2 = \frac{q(t)}{h} \omega^2 R_0, \quad (14)$$

то есть неоднородное обыкновенное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2\sigma}{dt^2} + \sigma\omega^2 = f(t), \quad \sigma(t_0) = A, \quad \left.\frac{d\sigma}{dt}\right|_{t=t_0} = B. \quad (15)$$

Общее решение однородного уравнения (15) находится в таком виде:

$$\sigma(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t.$$

Частное решение неоднородного уравнения (15) находится с помощью метода вариации произвольной постоянной:

$$\tilde{\sigma}(t) = -\frac{\cos \omega t}{\omega} \int_{t_0}^t f(\tau) \sin \omega \tau d\tau + \frac{\sin \omega t}{\omega} \int_{t_0}^t f(\tau) \cos \omega \tau d\tau,$$

или

$$\tilde{\sigma}(t) = \frac{1}{\omega} \int_{t_0}^t f(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau,$$

поэтому общее решение уравнения (15) будет

$$\sigma(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + \tilde{\sigma}(t),$$

таким образом, окончательно имеем

$$\sigma(t) = C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + \frac{1}{\omega} \int_{t_0}^t f(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau.$$

Для определения произвольных постоянных C_1 и C_2 воспользуемся начальными условиями и получим систему уравнений:

$$C_1 \cos \omega t_0 + C_2 \sin \omega t_0 = A,$$

$$-C_1 \sin \omega t_0 + C_2 \cos \omega t_0 = \frac{B}{\omega},$$

$$\sigma(t_0) = A = 0, \left.\frac{d\sigma}{dt}\right|_{t=t_0} = B, t_0 = 0, C_1 = A = 0, C_2 = \frac{B}{\omega} = \frac{1}{\omega} \left.\frac{d\sigma}{dt}\right|_{t=0}, \sigma(t) =$$

$$\left.\frac{d\sigma}{dt}\right|_{t=0} \frac{1}{\omega} \sin \omega t + \frac{1}{\omega} \int_0^t f(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau.$$

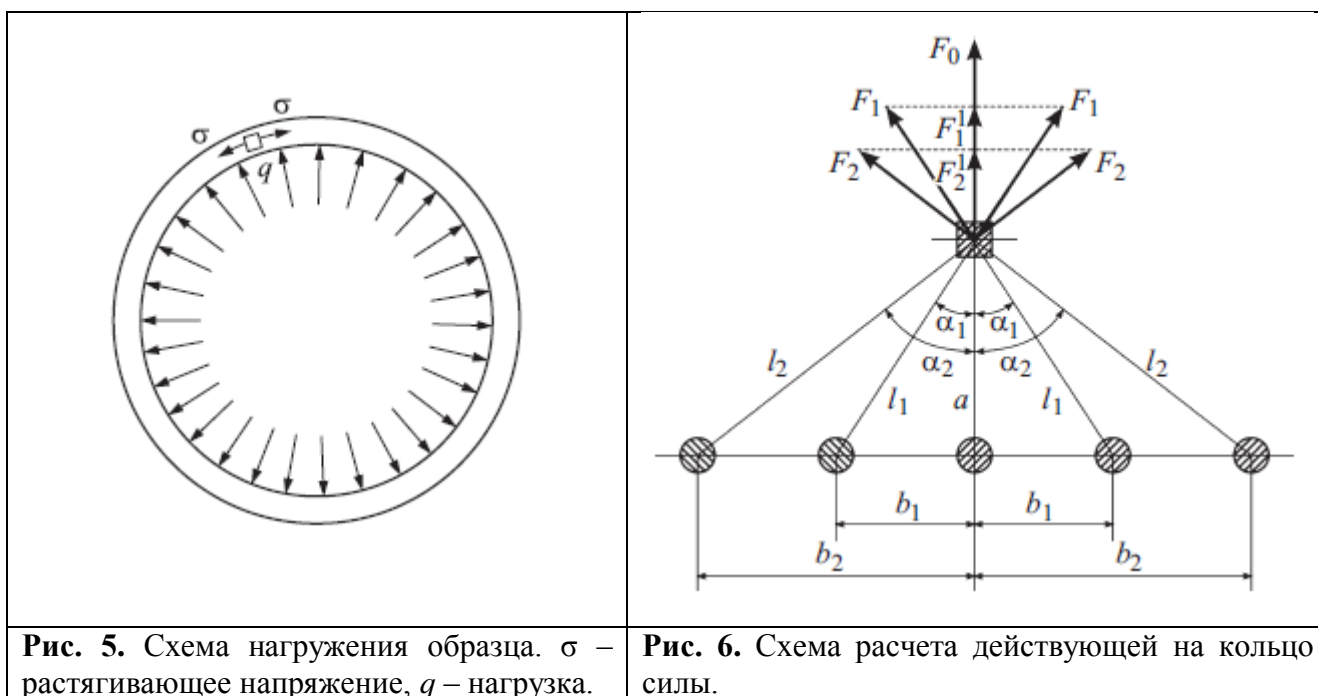
В конечном итоге, из уравнения (14) получается:

$$f(\tau) = \frac{\omega^2 R_0 q(t)}{h}.$$

Однако проблема заключается в том, что предположение (*) на практике не верно, и решение этого уравнения дает лишь качественное представление о движении кольца. Чтобы получить количественное представление – необходимо решать (9), но такое уравнение не имеет аналитического решения, поэтому необходимо его решать численными методами.

4. Расчёт силовых характеристик

На **рис. 5** показана схема [5-6] нагружения кольца, на **рис. 6** приведена схема [4] расчета силы, действующей со стороны катушки на внутреннюю поверхность кольцевого образца. Считается, что сила Ампера является основной действующей на кольцо силой, ее оценка проводится в предположении о квазистатичности процесса. Общая сила складывается из суммы сил, действующих на внутренность кольца со стороны витков катушки.



Итак, действующая на кольцо сила выводится из следующих соображений:

$$F(t) = F_0(t) + 2F_1^\perp(t) + 2F_2^\perp(t), \quad (7)$$

где

$$F_0(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1(t)I_2(t)}{a}, \quad F_i^\perp(t) = F_i(t) \cos \alpha_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1(t)I_2(t)}{l_i} \cos \alpha_i, \quad i = 1, 2,$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, $I_1(t)$ – ток в витке катушки, $I_2(t)$ – ток в кольце, a – расстояние от кольца до витка катушки.

Действующая на внутреннюю поверхность кольца распределенная нагрузка,

$$q(t) = \frac{F(t)l}{S},$$

где l – длина внутренней окружности кольца, а $S = lc$ – площадь внутренней поверхности кольца, c – ширина кольца. Таким образом,

$$q(t) = \frac{F(t)}{c}. \quad (8)$$

Окружное напряжение в кольце вычислялось следующим образом:

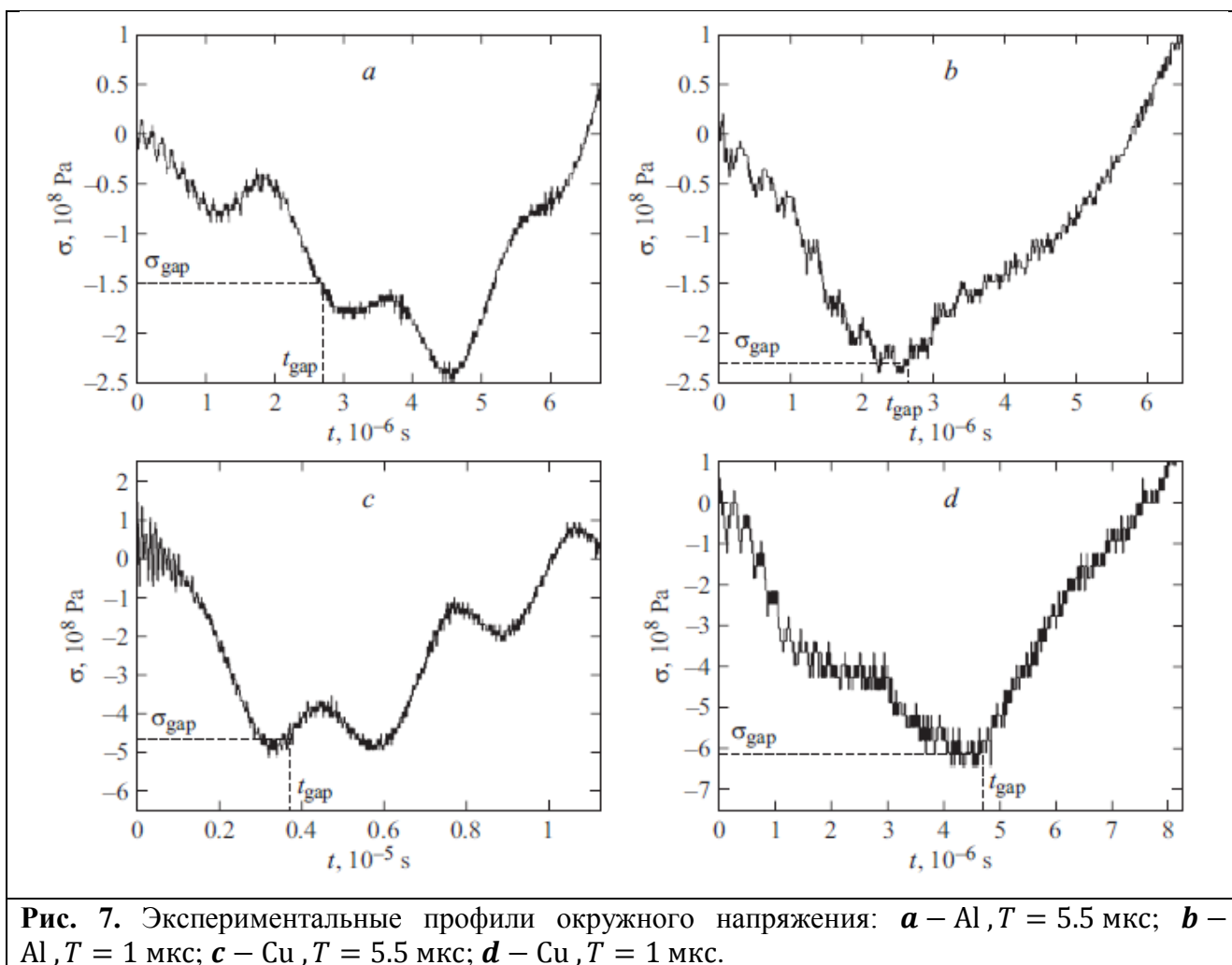
$$\sigma(t) = \dot{\sigma}|_{t=0} \frac{1}{\omega} \sin \omega t + \omega \frac{R_0}{h} \int_0^t q(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau, \quad (9)$$

где $\dot{\sigma}|_{t=0}$ бралось из эксперимента, R_0 – начальный радиус кольца, а h – толщина кольца.

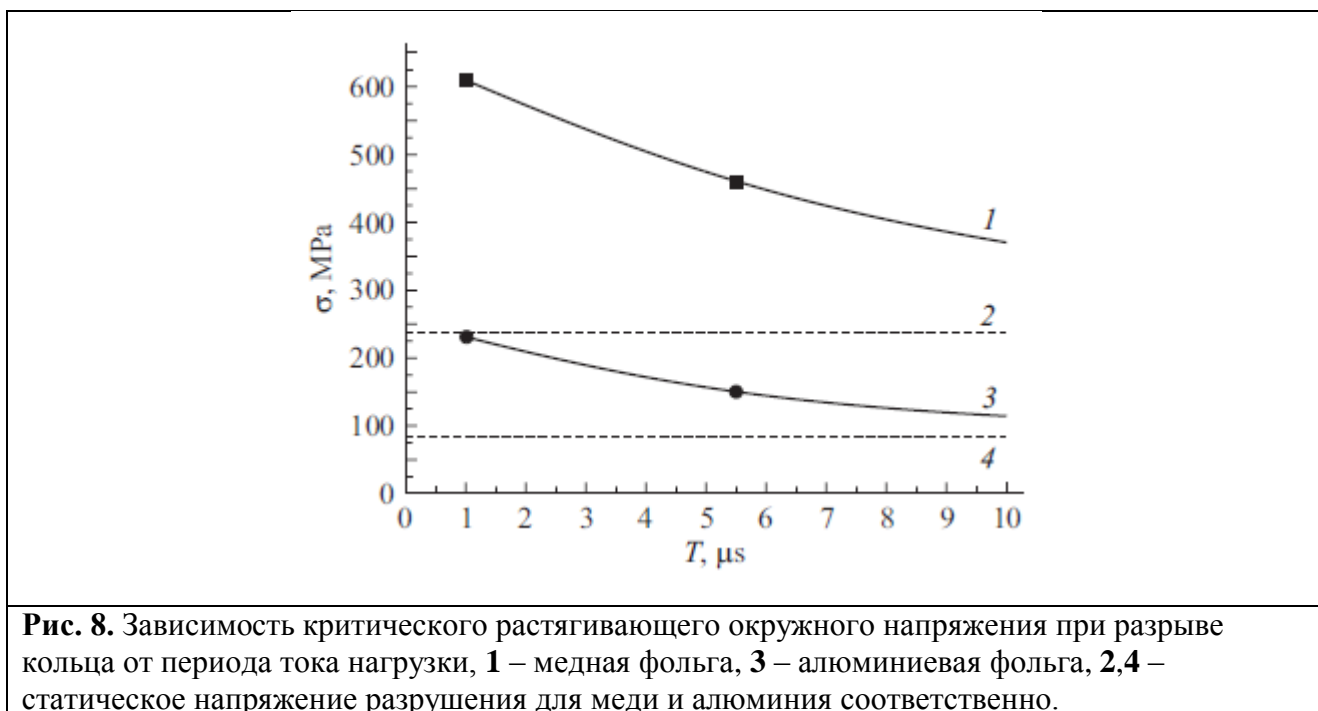
5. Результаты экспериментов

Изученные работы содержат обработанные результаты экспериментов, которые демонстрируют различие некоторых свойств материалов при статических и динамических нагрузках, вид колебаний в зависимости от длительности и вида использованного для нагружения импульса, а также зависимости силы Ампера и окружного напряжения от начальных условий эксперимента.

На **рис. 7** из работы [4] приведены профили напряжений для колец из алюминиевых и медных фольг при разных периодах тока в катушке. На этих же рисунках показано время до разрушения колец и напряжения при его разрыве. Из анализа измеренных экспериментальным путем профилей окружного напряжения был сделан важный вывод, что инерция кольца существенно сглаживает колебания давления на внутреннюю поверхность кольца. Как видно из **рис. 7, b** и **рис. 7, d**, эффект сглаживания проявляет себя сильнее при укорачивании периода колебаний. Важнейшим результатом инерционного сглаживающего эффекта является заметное увеличение длительности импульса окружного напряжения растягивающего кольцо, по сравнению с длительностью радиальной импульсной нагрузки действующей изнутри на расширение кольца.

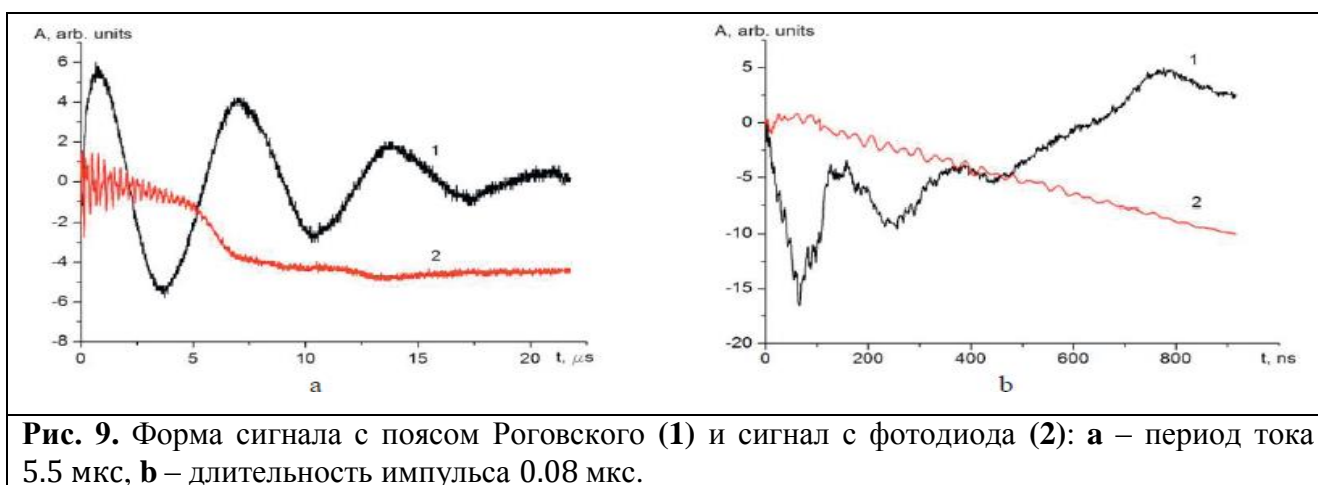


Также на **рис. 8** приведен график, показывающий зависимость окружного напряжения от периода тока в катушке. Эта диаграмма иллюстрирует эффект становления образцов более хрупкими при укорочении периода тока.



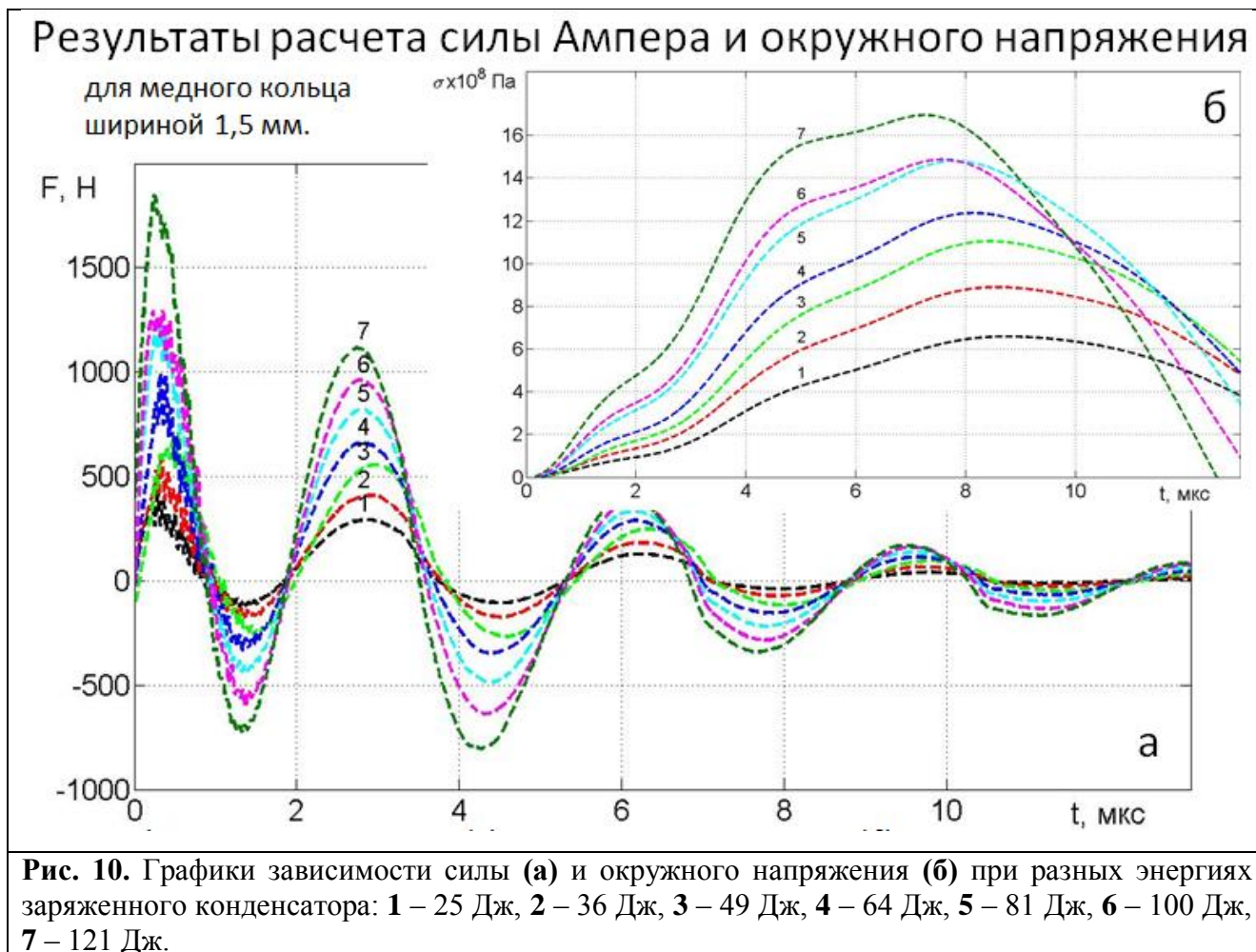
В проведенных экспериментах и расчётах использовались следующие параметры катушки (см. **рис. 6**): $a = 3$ мм, $b_1 = 7.5$ мм, $b_2 = 15$ мм.

В результате экспериментов в работе [7], были получены осциллограммы, представленные на **рис. 9**, демонстрирующие форму сигнала тока, проходящего



через катушку при двух способах нагружения и возрастающего в момент излома. Образцы были выполнены из медных и алюминиевых фольг толщиной 0.015 мм и шириной 0.5–2.0 мм.

Также были измерены сила Ампера и окружное напряжение для разных энергий заряженного конденсатора – **рис. 10**, и различных материалов – **рис. 11**.



Результаты расчета силы Ампера и окружного напряжения

Для энергии заряда конденсатора $\propto 10^8$ Па
 $E = 49$ Дж

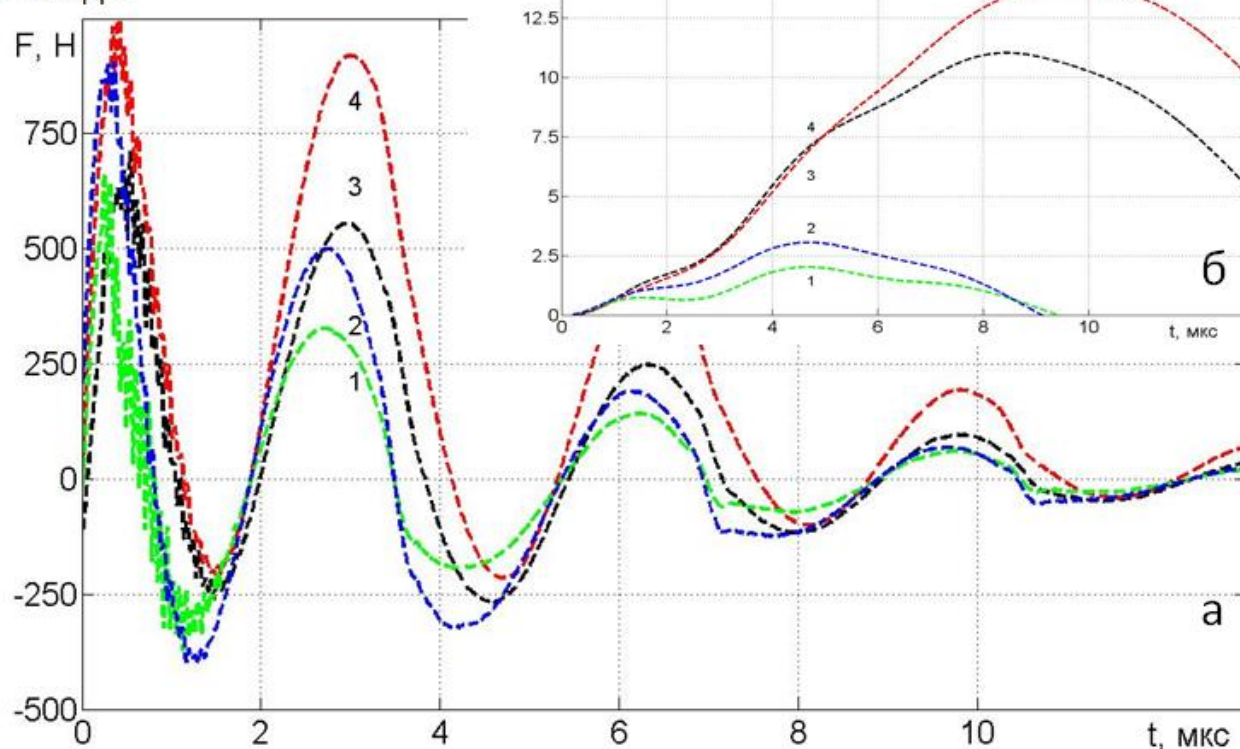


Рис. 11. Графики зависимости силы (а) и окружного напряжения (б) для разных материалов: 1 – Al шириной 3.0 мм, 2 – Al шириной 5.0 мм, 3 – Cu шириной 1.5 мм, 4 – Cu шириной 3.1 мм.

Заключение

- В работах [1-3] был применен магнитно-импульсный метод с принципиально новым способом регистрации процесса разрушения образца с помощью высокоскоростной камеры, а также были представлены зависимости образования шеек, как от времени, так и от длины образца, а также зависимости фрагментации в тех же переменных.
- Было разработано три модификации магнитно-импульсного метода для различных вариантов нагружения, которые позволили сократить длительность воздействия на несколько порядков, а также две модификации для разных способов определения тока в кольцевом

образце. Также был разработан новый метод фоторегистрации момента разрыва кольца.

- Показано, что инерция кольца при высокой скорости деформации существенно сглаживает колебания напряжения в кольце, что может привести к заметному увеличению продолжительности импульса растягивающего окружного напряжения по сравнению с длительностью первоначального импульса.
- Установлено, что энергия, необходимая для разрушения образцов, с уменьшением времени воздействия возрастает, а образцы разрушаются более хрупко. Доля вязкой составляющей в разломе снижается с уменьшением продолжительности импульса.
- Представлен анализ уравнений, которые описывают электромагнитные колебания в системе катушка-кольцо, было выведено уравнение, которое позволяет определить ток в кольце. Предложен метод оценки действующей на кольцо радиальной силы, а также определены окружные напряжения, приводящие к разрыву кольца, и измерены профили радиального давления на внутреннюю поверхность кольца.

Список использованной литературы

- [1] Zhang O. H., Ravi-Chandar K. Int. J. Fract. (2006) 142: 183.
- [2] Zhang O. H., Ravi-Chandar K. International Journal of Fracture (2008) 150: 3.
- [3] Zhang O. H., Ravi-Chandar K. Int. J. Fract. (2010) 163: 41.
- [4] В. А. Морозов, Ю. В. Петров, А. А. Лукин, А. Г. С. А. Атрошенко, Д.А. Грибанов. Разрыв металлических колец при ударном нагружении магнитно-импульсным методом. ЖТФ, 2014, том 84, вып. 9, С. 78-85.
- [5] Морозов В.А., Петров Ю.В., Лукин А.А., Кац В.М., Удовик А.Г., Атрошенко С.А., Федоровский Г.Д. // ДАН. 2011. Т. 439. № 6. С. 761–763.
- [6] Морозов В.А., Петров Ю.В., Лукин А.А., Кац В.М., Удовик А.Г., Атрошенко С.А., Грибанов Д.А., Федоровский Г.Д. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 6. С. 51–56.
- [7] A.A. Lukin, N.F. Morozov, V.A. Morozov, Yu.V. Petrov. Fracture of metal ring samples caused by magnetic pulse loading in a wide time range of durations. 20th European Conference on Fracture (ECF20). Procedia Materials Science 3 (2014) 686 – 690.